

doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-198-205

УДК 621.387.322

## Золь-гель синтез $Gd_2O_3:Nd^{3+}$ нанопорошков и исследование их люминесцентных свойств

Амир Муссауи<sup>1</sup>, Дмитрий Владимирович Булыга<sup>2</sup>,  
Наталья Константиновна Кузьменко<sup>3</sup>, Александр Иванович Игнатъев<sup>4</sup>,  
Сергей Константинович Евстропьев<sup>5</sup>✉, Николай Валентинович Никоноров<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

<sup>5</sup> Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация

<sup>1</sup> [am.moussaoui92@gmail.com](mailto:am.moussaoui92@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>

<sup>2</sup> [dmbulyga@yandex.ru](mailto:dmbulyga@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>

<sup>3</sup> [Nataliakuz01@yandex.ru](mailto:Nataliakuz01@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-7213-8231>

<sup>4</sup> [ignatiev@oi.ifmo.ru](mailto:ignatiev@oi.ifmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>

<sup>5</sup> [evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)✉, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

<sup>6</sup> [Nikonorov@oi.ifmo.ru](mailto:Nikonorov@oi.ifmo.ru), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

### Аннотация

**Предмет исследования.** В работе приведены результаты золь-гель синтеза нанопорошков  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  цитратным методом. Исследованы их структуры и люминесцентные свойства. Предложена и опробована методика использования при золь-гель синтезе двух органических стабилизаторов, имеющих различную термическую устойчивость. Изучены люминесцентные свойства полученных  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  порошков в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях спектра. **Метод.** Для синтеза материалов применен цитратный золь-гель метод. В качестве основных исходных компонентов использованы водные растворы нитратов металлов, а в качестве органических модифицирующих компонентов — лимонная кислота и поливинилпирролидон. Эти компоненты выполняли двойную функцию в процессе синтеза: выступали стабилизаторами формирующихся наночастиц в коллоидных растворах, а также выполняли роль «горючей» добавки, которая при сгорании в процессе термообработки материалов повышает температуру реакционной смеси. Для исследования процессов эволюции структуры материалов при синтезе использованы методы инфракрасной спектроскопии, дифференциально-термического и термогравиметрического анализов. **Основные результаты.** Кристаллические нанопорошки  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  получены низкотемпературным золь-гель методом при использовании лимонной кислоты и поливинилпирролидона в качестве стабилизаторов. Данные инфракрасной спектроскопии и дифференциально-термического и термогравиметрического анализов показывали, что формирование наночастиц  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  начинается на стадии сырого геля. Процесс эволюции развивается во время сушки и термообработки материалов. Показано, что применение двух органических стабилизаторов, имеющих различную термическую устойчивость, обеспечивает стабилизацию формирующихся наночастиц  $Gd_2O_3$  на разных этапах синтеза в широком температурном диапазоне. При возбуждении синтезированных нанопорошков излучением с длиной волны 238 нм наблюдается люминесценция в ультрафиолетовой части спектра, определяемая электронными переходами в кристаллической матрице  $Gd_2O_3$ . Полученные  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  нанопорошки демонстрируют интенсивную фотолюминесценцию в ультрафиолетовой и ближней инфракрасной областях спектра. **Практическая значимость.** Экспериментальные данные, полученные в настоящей работе, могут быть применены при разработке технологических процессов производства люминофоров, а также люминесцентных материалов для нанотермометрии в медицине.

### Ключевые слова

золь-гель синтез, спектр поглощения, люминесценция, наночастица,  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Белорусского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-58-00054).

**Ссылка для цитирования:** Муссауи А., Булыга Д.В., Кузьменко Н.К., Игнат'ев А.И., Евстропьев С.К., Никоноров Н.В. Золь-гель синтез  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  нанопорошков и исследование их люминесцентных свойств // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 2. С. 198–205. doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-198-205

## Sol-gel synthesis of $Gd_2O_3:Nd^{3+}$ nanopowders and the study of their luminescent properties

Amir Moussaoui<sup>1</sup>, Dmitry V. Bulyga<sup>2</sup>, Natalia K. Kuzmenko<sup>3</sup>,  
Alexander I. Ignat'ev<sup>4</sup>, Sergey K. Evstropiev<sup>5</sup>, Nikolay V. Nikonorov<sup>6</sup>

<sup>1,2,3,4,5,6</sup> ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

<sup>5</sup> St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

<sup>1</sup> am.moussaoui92@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>

<sup>2</sup> dmbulyga@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>

<sup>3</sup> Nataliakuz01@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7213-8231>

<sup>4</sup> ignatiev@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>

<sup>5</sup> evstropiev@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>

<sup>6</sup> Nikonorov@oi.ifmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>

### Abstract

The paper presents the results of the sol-gel synthesis of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanopowders by the citrate method, as well as the study of their structure and luminescent properties. A technique for using two different organic stabilizers with different thermal stability in sol-gel synthesis has been proposed and tested. The luminescent properties of the obtained  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  powders have been studied in the ultraviolet and near infrared spectral regions. The citrate sol-gel method was used to synthesize the materials. Aqueous solutions of metal nitrates were used as the main initial components. Citric acid and polyvinylpyrrolidone were used as organic modifying components, playing a double role in the synthesis process, i.e. acting as stabilizers of forming nanoparticles in colloidal solutions and serving as a fuel additive in the process of heat treatment of materials. Infrared spectroscopy and differential thermal and thermogravimetric analyses were used to study the evolution of the structure of materials during synthesis. Crystalline  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanopowders were obtained by a low-temperature sol-gel method using citric acid and polyvinylpyrrolidone as stabilizers. The data of infrared spectroscopy and differential thermal and thermogravimetric analyses show that the formation of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanoparticles begins at the stage of the crude gel and the evolution process develops during the drying and heat treatment of materials. It is shown that the use of two different organic stabilizers with different thermal stability provides stabilization of the forming  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanoparticles at different stages of synthesis in a wide temperature range. The luminescence spectra are observed in the UV spectral region under excitation of the synthesized nanopowders by radiation with a wavelength of 238 nm. They are determined by electronic transitions in the  $Gd_2O_3$  crystalline matrix. The synthesized  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanopowders exhibit intense photoluminescence in the UV and near-IR spectral regions. The results can be used in the development of a technology for the synthesis of various composite phosphors, as well as in the creation of luminescent nanopowders for nanothermometry in medicine.

### Keywords

sol-gel synthesis, absorption spectrum, luminescence, nanoparticle,  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$

### Acknowledgements

This work was funded by the Russian Foundation for Basic Research and Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project No. 20-58-00054).

**For citation:** Moussaoui A., Bulyga D.V., Kuzmenko N.K., Ignat'ev A.I., Evstropiev S.K., Nikonorov N.V. Sol-gel synthesis of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanopowders and the study of their luminescent properties. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2021, vol. 21, no. 2, pp. 198–205 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2021-21-2-198-205

### Введение

Нанокристаллические материалы на основе оксида гадолиния ( $Gd_2O_3$ ) характеризуются высокими люминесцентными свойствами, термостойкостью и химической устойчивостью, перспективны для различных оптических, экологических и медицинских приложений [1–5].

Для синтеза нанокристаллов  $Gd_2O_3$  часто используются жидкостные методы: золь-гель процесс [6–9]; полимерно-солевой метод [10]; синтез при нагревании неводных растворов [11, 12]; термохимический способ [5, 13–16]; осаждение из растворов [17, 18]; гидротермальный метод [3–5]; распылительный пиролиз [19]. Установлено, что кристаллическая структура и люми-

несцентные свойства нанокристаллов зависят от метода их получения. Нанокристаллы  $Gd_2O_3$ , полученные низкотемпературными методами, такими как золь-гель процесс или полимерно-солевой синтез, имеют кубическую структуру, являющуюся стабильной формой оксида гадолиния до 1250 °C [20].

Золь-гель процесс, широко известный и применяемый для получения различных материалов, обеспечивает их высокую однородность и относительно низкие температуры синтеза [6, 8, 17, 21–25]. Так, в [17] формирование кристаллов  $Gd_2O_3$  наблюдалось при термообработке гелей до температуры всего 400 °C, что существенно ниже температур технологических процессов, традиционно используемых при производстве оксидных оптических материалов.

Цитратный золь-гель метод, основанный на введении в исходные растворы лимонной кислоты с последующим их нагревом и формированием однородных гелей, применяется для создания люминесцентных наноматериалов на основе оксида гадолиния [1, 2].

Лимонная кислота и поливинилпирролидон (ПВП) играют двойную роль в процессе синтеза, выступая стабилизаторами формирующихся наночастиц в коллоидных растворах и исполняя роль горючей добавки в процессе термообработки материалов [2, 26].

Лимонная кислота образует в растворах хелатные соединения с ионами металлов [21] и используется для формирования оксидных нанофосфоров [1, 2, 21, 24]. В процессе золь-гель синтеза молекулы лимонной кислоты претерпевают эволюцию на стадии нагрева исходного раствора и формирования геля [21] и полностью разлагаются при  $T > 175$  °C [27], т. е. температурах существенно более низких, чем температуры разложения нитратов металлов [28]. По этой причине лимонная кислота является эффективным, но относительно низкотемпературным стабилизатором оксидных наночастиц.

ПВП является растворимым органическим полимером, используемым для стабилизации различных наночастиц [26, 28, 29]. Термическое разложение и окисление ПВП происходит при температурах 300–550 °C, близких к температурам разложения нитратов металлов и образования оксидных наночастиц. Присутствие ПВП в исходных растворах оказывает существенное влияние на размер и свойства формируемых наночастиц [7, 29]. По сравнению с лимонной кислотой ПВП — более высокотемпературный стабилизатор, непосредственно участвующий в формировании оксидных наночастиц.

Цель настоящей работы — разработка низкотемпературного цитратного золь-гель синтеза нанопорошков  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  с одновременным применением двух органических стабилизаторов (образцы № 1 и № 2, представленные в таблице), изучение эволюции структуры наночастиц в процессе их формирования и исследование люминесцентных свойств полученных нанопорошков.

### Материалы и методы

В качестве исходных материалов использованы водные растворы нитратов гадолиния (Gd) и неодима (Nd), лимонная кислота и ПВП. Водные растворы компонентов получены растворением порошкообразных реактивов в дистиллированной воде при интенсивном перемешивании. Смешение заданных объемов раство-

ров компонентов проводилось при комнатной температуре. Химический состав полученных жидких смесей приведен в таблице.

Смешанные растворы подвергались термообработке при температуре 70 °C при перемешивании.

Процессы эволюции материалов при золь-гель синтезе в настоящей работе изучены методами инфракрасной (ИК) спектроскопии и дифференциально-термического и термогравиметрического (ДТА-ТГ) анализа.

Измерения ИК спектров гелей выполнены с помощью спектрометра Bruker ALPHA, ДТА-ТГ анализ материалов — на STA 449F1 Jupiter (Netzsch).

Для изучения фотолюминесценции растворов и композитов в области длин волн  $\lambda = 250$ –800 нм применен люминесцентный спектрометр Perkin-Elmer LS 50B.

Исследование эмиссионных свойств материалов осуществлялось на экспериментальной установке, включающей в себя лазерный источник на кристалле YAG:Nd (длина волны  $\lambda = 532$  нм), генерирующий импульсы с длительностью  $\tau = 10$  нс и энергией  $E = 30$  мДж. Для регистрации эмиссионных спектров использовались монохроматор Acton-300 (Acton Research) и InGaAs-фотоприемник ID-44 (Acton Research). В процессе проведения исследований порошки  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  плотно фиксировались в пространстве между двумя плоскопараллельными полированными пластинами из кварцевого стекла, при этом толщина слоя нанопорошка между пластинами составляла 150 мкм. Лазерное излучение фокусировалось в пятно диаметром около 130 мкм на поверхности пластин.

### Результаты и обсуждение

**Процессы эволюции материалов в процессе золь-гель синтеза.** На рис. 1 приведен спектр поглощения композиционного геля образца № 1 (таблица) в ИК области спектра. Широкая и интенсивная полоса поглощения в области 3300–3500  $cm^{-1}$  связана с валентными колебаниями O–H-групп. Наличие в спектре сырого геля этой полосы является закономерным. Присутствие в составе сырого геля анионов  $COO^-$  и молекул ПВП определяет наличие в спектрах интенсивной полосы поглощения колебаний карбонильной группы C=O максимумом при волновом числе 1631  $cm^{-1}$ . До термообработки в составе геля сохраняются нитрат-анионы, определяющие поглощение света в области 1460  $cm^{-1}$ .

Полоса поглощения с максимумом при волновом числе 537  $cm^{-1}$  связана с колебаниями связи Gd–O в кубических кристаллах  $Gd_2O_3$  [13, 25]. Этот результат позволяет предположить, что формирование частиц

Таблица. Химический состав материалов

Table. Chemical composition of materials

Номер образца	Концентрация, масс. %						
	Раствор					Порошок	
	Вода	$Gd(NO_3)_3$	$Nd(NO_3)_3$	Лимонная кислота	ПВП	$Gd_2O_3$	Nd
1	88,22	4,18	0,05	2,26	5,29	99	1
2	87,74	4,15	0,05	2,80	5,26	99	1

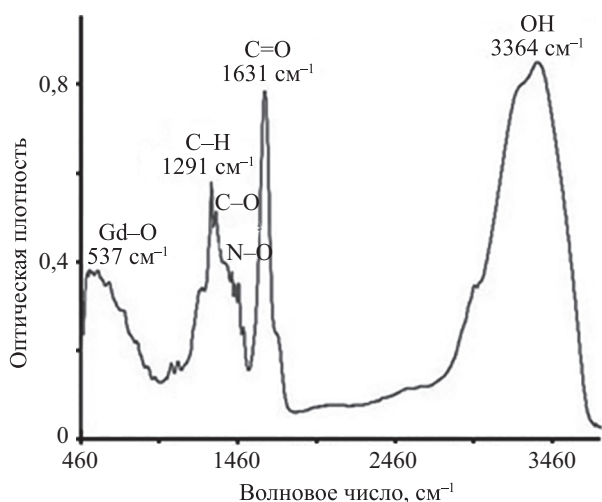


Рис. 1. Спектр поглощения композиционного геля в инфракрасной области спектра

Fig. 1. Absorption spectrum of composite gel in the IR spectral region

оксида гадолиния начинается еще на стадии формирования геля.

Аналогичные результаты были получены ранее при формировании цитратным золь-гель методом схожих по структуре материалов  $Y_2O_3:Eu$  [21]. Полоса поглощения (волновое число равно  $560\text{ см}^{-1}$ ) колебаний связи  $Y-O$  кубических кристаллов  $Y_2O_3$  проявлялась в спектрах уже после сушки гелей при  $100\text{ }^\circ\text{C}$ , и ее интенсивность возрастала по мере увеличения температуры термообработки материалов [21]. В порошках  $Gd_2O_3:Eu^{3+}, Tb^{3+}$ , полученных золь-гель методом из элементоорганических соединений, полоса колебаний связи  $Gd-O$  появлялась после термообработки материалов при  $600\text{ }^\circ\text{C}$  [25].

**Дифференциально-термический и термогравиметрический анализ процессов, протекающих при термообработке гелей.** Нагрев гелей в процессе термообработки приводит к разложению лимонной кислоты, солей металлов и ПВП, и к образованию и росту оксидных кристаллов. На рис. 2 приведены данные ДТА-ТГ

анализа процессов, протекающих при термообработке геля образца № 1. Из рис. 2, а видно, что при нагреве гелей наблюдается ступенчатое уменьшение массы образца, сопровождающееся несколькими экзотермическими эффектами (рис. 2, б).

Потери массы образца и небольшое поглощение тепла на начальных стадиях термообработки ( $20-150\text{ }^\circ\text{C}$ ) определяются удалением из материала остаточной воды. При достижении температуры разложения лимонной кислоты ( $175\text{ }^\circ\text{C}$  [27]), наблюдается заметное уменьшение массы образца, сопровождающееся выделением тепла.

Наиболее сильные изменения массы образца и экзотермические эффекты наблюдаются в широком температурном диапазоне  $340-850\text{ }^\circ\text{C}$ . При температурах  $340-550\text{ }^\circ\text{C}$  происходит разложение нитратов металлов и ПВП, сопровождающееся значительным выделением тепла и газообразных продуктов [28].

### Люминесцентные свойства синтезированных порошков $Gd_2O_3:Nd^{3+}$

Люминесценция порошков в ультрафиолетовой (УФ) области спектра. В УФ области спектра люминесцентные свойства синтезированных порошков в основном определяются электронными переходами в кристаллической матрице  $Gd_2O_3$ , подробно описанными в [15].

В спектрах возбуждения люминесценции в УФ области спектра (рис. 3, а) наблюдаются полосы с максимумами длин волн 238, 257, 268 и 282 нм. Аналогичные спектры возбуждения люминесценции рассмотрены в работе [5] в  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  нанопорошках, полученных термохимическим и гидротермальным методами синтеза. По данным [5, 7, 15, 16] наиболее интенсивная полоса с максимумом  $\lambda_{max} = 238\text{ нм}$  связана с переходом  ${}^6P_{7/2} \rightarrow {}^8S_{7/2}$  ионов  $Gd^{3+}$  в кристаллической матрице  $Gd_2O_3$ . Полоса с максимумом 268 нм соответствует электронному переходу  ${}^8S_{7/2} \rightarrow {}^6I_{7/2-17/2}$  ионов  $Gd^{3+}$  в кристаллической матрице  $Gd_2O_3$  [30]. Полоса переноса заряда с максимумом  $\lambda_{max} \sim 257\text{ нм}$  между ионами кислорода и ионами  $Eu^{3+}$  приведена в [5, 7, 30].

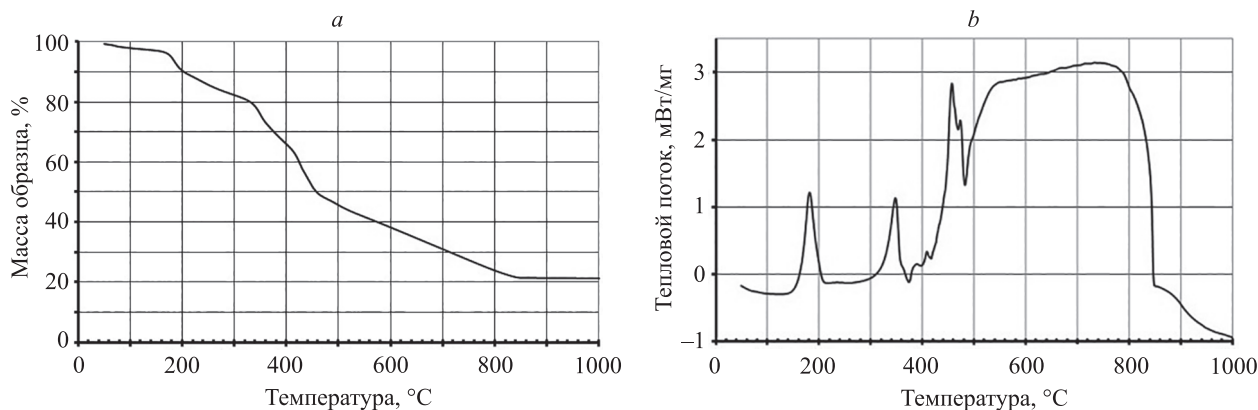


Рис. 2. Результаты термогравиметрического (а) и дифференциально-термического (б) анализов процессов, протекающих при термообработке гелей

Fig. 2. Results of the thermal gravimetric (a) and differential thermal (b) analyses of the processes occurring during heat treatment of the gels



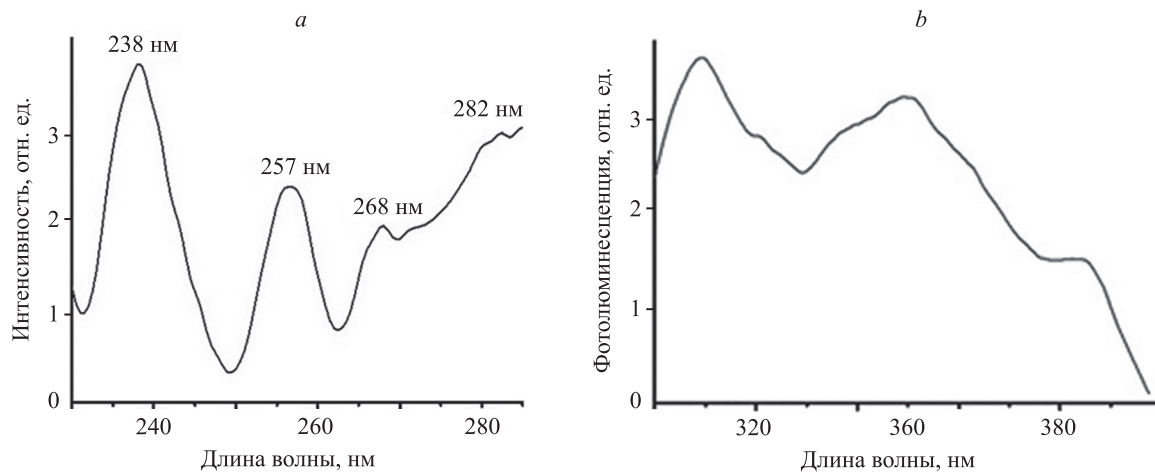


Рис. 3. Спектр возбуждения люминесценции (длина волны люминесценции 309 нм) порошка  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  (a); спектр фотолюминесценции (длина волны возбуждения люминесценции 238 нм) порошка  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  (b)

Fig. 3. Luminescence excitation spectrum (wavelength of the luminescence 309 nm) of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  powder (a); Photoluminescence spectrum (wavelength of the luminescence excitation 238 nm) of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  powder (b)

Соотношение между интенсивностями полос, наблюдаемых в спектрах возбуждения люминесценции, было различным для  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  нанопорошков, одинакового химического состава, но полученных различными методами [5]. Полученные в настоящей работе экспериментальные результаты показывают, что изменение содержания в исходных растворах лимонной кислоты не влияет на соотношение интенсивности полос, наблюдаемых в спектрах возбуждения люминесценции.

При возбуждении синтезированных порошков излучением с длиной волны  $\lambda_{\text{возб}} = 238$  нм наблюдается люминесценция в УФ части спектра (рис. 3, b), определяемая электронными переходами в кристаллической матрице  $Gd_2O_3$ . Изменение содержания в исходных растворах лимонной кислоты практически не оказало влияния на форму спектра люминесценции в УФ области спектра.

**Люминесценция порошков в ИК области спектра.** Интенсивная люминесценция, наблюдаемая в

синтезированных порошках в ближней ИК области спектра, определяется электронными переходами иона-активатора  $Nd^{3+}$ . Спектр фотолюминесценции синтезированного порошка  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  приведен на рис. 4. Наблюдаемые на спектре три группы полос люминесценции, расположенные при длинах волн 940, 1060 и 1360 нм, связаны с электронными переходами ионов  $Nd^{3+}$   ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ ,  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$  и  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  соответственно. Наиболее интенсивный пик люминесценции ионов неодима с максимумом  $\lambda_{\text{max}} = 1064$  нм соответствует электронному переходу  ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ .

Сопоставление экспериментальных результатов, показанных на рис. 4, с данными, приведенными в [10] для  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  материалов, синтезированных полимерно-солевым методом, показало близость спектров фотолюминесценции порошков, полученных различными жидкостными методами. С одной стороны, это проявление малой чувствительности люминесцентных свойств, определяемых f-f электронными переходами  $Nd^{3+}$ , к изменению структуры их ближайшего окружения [31]. С другой стороны, это объясняется определенной схожестью химического состава исходных реагентов, используемых температурно-временных режимов синтеза и, как следствие этого, близостью морфологии и кристаллической структуры полученных порошков.

### Заключение

Разработан цитратный золь-гель синтез нанопорошков  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  с одновременным применением двух органических стабилизаторов, изучена эволюция структуры наночастиц в процессе их формирования, и исследованы люминесцентные свойства полученных нанопорошков. В качестве модифицирующих органических стабилизаторов использовалась лимонная кислота и поливинилпирролидон, которые выступали не только стабилизаторами формирующихся наночастиц  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  в коллоидных растворах, но и исполняли роль «горючих» добавок в процессе термообработки материалов. Данные инфракрасной спектроскопии,

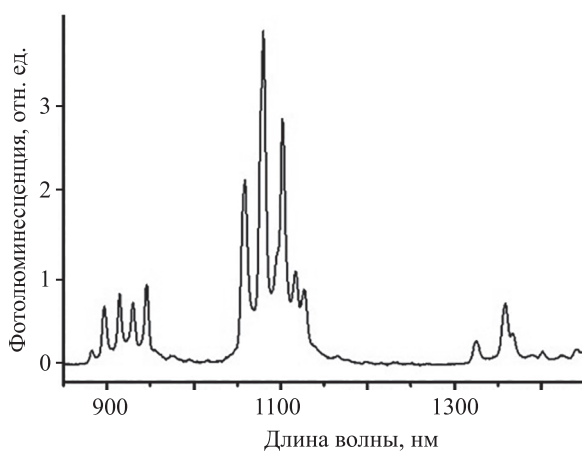


Рис. 4. Спектр фотолюминесценции ( $\lambda_{\text{возб}} = 980$  нм) порошка  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  (образец № 1) в ближней инфракрасной области спектра

Fig. 4. Photoluminescence spectrum ( $\lambda_{\text{ex}} = 980$  nm) of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  powder (sample 1) in the NIR region

дифференциально-термического и термогравиметрического анализов показывали, что формирование наночастиц  $Gd_2O_3$  начинается на стадии сырого геля и процесс эволюции развивается в процессе сушки и термообработки материалов. Полученные  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  нанопорошки продемонстрировали интенсивную фотолюминесценцию в ультрафиолетовой и ближней ин-

фракрасной областях спектра. Полученные результаты могут быть использованы при разработке технологии получения объемной керамики для дисковых лазерных элементов, при создании люминесцентных нанопорошков для нанотермометрии в медицине, а также при разработке технологии синтеза различных композитных люминофоров.

### Литература

1. Yu Y., Zheng Y.D., Qin F., Cheng Z.M., Zheng C.B., Zhang Z.G., Cao W.W. Experimental investigation on the upconversion mechanism of 754 nm NIR luminescence of  $Ho^{3+}/Yb^{3+}:Y_2O_3, Gd_2O_3$  under 976 nm diode laser excitation // *Journal of Luminescence*. 2011. V. 131. N 2. P. 190–193. doi: 10.1016/j.jlumin.2010.09.033
2. Kumar R.G.A., Hata S., Gopchandran K.G. Diethylene glycol mediated synthesis of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphor and its Judd-Offelt analysis // *Ceramics International*. 2013. V. 39. N 8. P. 9125–9136. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.05.010
3. Wang Z., Wang P., Zhong J., Liang H., Wang J. Phase transformation and spectroscopic adjustment of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  synthesized by hydrothermal method // *Journal of Luminescence*. 2014. V. 152. P. 172–175. doi: 10.1016/j.jlumin.2013.11.040
4. Dhananjaya N., Nagabhushana H., Sharma S.C., Rudraswamy B., Shivakumara C., Nagabhushana B.M. Hydrothermal synthesis of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphors: Effect of surfactant on structural and luminescence properties // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. V. 587. P. 755–762. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.10.121
5. Dhananjaya N., Nagabhushana H., Nagabhushana B.M., Rudraswamy B., Shivakumara C., Chakradhar R.P.S. Spherical and rod-like  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphors – structural and luminescent properties // *Bulletin of Materials Science*. 2012. V. 35. N 4. P. 519–527. doi: 10.1007/s12034-012-0330-6
6. Ferrara M.C., Altamura D., Schioppa M., Tapfer L., Nichelatti E., Pilloni L., Montecchi M. Growth, characterization and optical properties of nanocrystalline gadolinia thin films prepared by sol-gel dip coating // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2008. V. 41. N 22. P. 225408. doi: 10.1088/0022-3727/41/22/225408
7. Liu X., Zhou F., Gu M., Huang S., Liu B., Ni C. Fabrication of highly a-axis-oriented  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  thick film and its luminescence properties // *Optical Materials*. 2008. V. 31. N 2. P. 126–130. doi: 10.1016/j.optmat.2008.02.001
8. Pang M.L., Lin J., Fu J., Xing R.B., Luo C.X., Han Y.C. Preparation, patterning and luminescent properties of nanocrystalline  $Gd_2O_3:A$  ( $A = Eu^{3+}, Dy^{3+}, Sm^{3+}, Er^{3+}$ ) phosphor films via Pechini sol-gel soft lithography // *Optical Materials*. 2003. V. 23. N 3–4. P. 547–558. doi: 10.1016/S0925-3467(03)00020-X
9. Jain A., Hirata G.A. Photoluminescence, size and morphology of red-emitting  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphor synthesized by various methods // *Ceramics International*. 2016. V. 42. N 5. P. 6428–6435. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.01.053
10. Kuzmenko N.K., Evstropiev S.K., Aseev V.A., Danilovich D.P., Nikonorov N.V., Ignatiev A.I., Matrosova A.S., Demidov V.V., Emerson A.V., Sevastyanova I.M. Polymer-salt synthesis of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanophosphors // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1695. P. 012184. doi: 10.1088/1742-6596/1695/1/012184
11. Majeed S., Shivaahankar S.A. Rapid, microwave-assisted synthesis of  $Gd_2O_3$  and  $Eu:Gd_2O_3$  nanocrystals: characterization, magnetic, optical and biological studies // *Journal of Materials Chemistry B*. 2014. V. 2. N 34. P. 5585–5593. doi: 10.1039/c4tb00763h
12. Seo S., Yang H., Holloway P.H. Controlled shape growth of Eu- or Tb-doped luminescent  $Gd_2O_3$  colloidal nanocrystals // *Journal of Colloid and Interface Science*. 2009. V. 331. N 1. P. 236–242. doi: 10.1016/j.jcis.2008.11.016
13. Tamrakar R.K., Bisen D.R., Sahu I.P. Structural characterization of combustion synthesized  $Gd_2O_3$  nanopowder by using glycerin as fuel // *Advance Physics Letter*. 2014. V. 1. N 1. P. 6–9.
14. Sun L., Yao J., Liu C., Liao C., Yan C. Rare earth activated nanosized oxide phosphors: synthesis and optical properties // *Journal of Luminescence*. 2000. V. 87–89. P. 447–450. doi: 10.1016/S0022-2313(99)00471-8

### References

1. Yu Y., Zheng Y.D., Qin F., Cheng Z.M., Zheng C.B., Zhang Z.G., Cao W.W. Experimental investigation on the upconversion mechanism of 754 nm NIR luminescence of  $Ho^{3+}/Yb^{3+}:Y_2O_3, Gd_2O_3$  under 976 nm diode laser excitation. *Journal of Luminescence*, 2011, vol. 131, no. 2, pp. 190–193. doi: 10.1016/j.jlumin.2010.09.033
2. Kumar R.G.A., Hata S., Gopchandran K.G. Diethylene glycol mediated synthesis of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphor and its Judd-Offelt analysis. *Ceramics International*, 2013, vol. 39, no. 8, pp. 9125–9136. doi: 10.1016/j.ceramint.2013.05.010
3. Wang Z., Wang P., Zhong J., Liang H., Wang J. Phase transformation and spectroscopic adjustment of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  synthesized by hydrothermal method. *Journal of Luminescence*, 2014, vol. 152, pp. 172–175. doi: 10.1016/j.jlumin.2013.11.040
4. Dhananjaya N., Nagabhushana H., Sharma S.C., Rudraswamy B., Shivakumara C., Nagabhushana B.M. Hydrothermal synthesis of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphors: Effect of surfactant on structural and luminescence properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 587, pp. 755–762. doi: 10.1016/j.jallcom.2013.10.121
5. Dhananjaya N., Nagabhushana H., Nagabhushana B.M., Rudraswamy B., Shivakumara C., Chakradhar R.P.S. Spherical and rod-like  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphors — structural and luminescent properties. *Bulletin of Materials Science*, 2012, vol. 35, no. 4, pp. 519–527. doi: 10.1007/s12034-012-0330-6
6. Ferrara M.C., Altamura D., Schioppa M., Tapfer L., Nichelatti E., Pilloni L., Montecchi M. Growth, characterization and optical properties of nanocrystalline gadolinia thin films prepared by sol-gel dip coating. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, vol. 41, no. 22, pp. 225408. doi: 10.1088/0022-3727/41/22/225408
7. Liu X., Zhou F., Gu M., Huang S., Liu B., Ni C. Fabrication of highly a-axis-oriented  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  thick film and its luminescence properties. *Optical Materials*, 2008, vol. 31, no. 2, pp. 126–130. doi: 10.1016/j.optmat.2008.02.001
8. Pang M.L., Lin J., Fu J., Xing R.B., Luo C.X., Han Y.C. Preparation, patterning and luminescent properties of nanocrystalline  $Gd_2O_3:A$  ( $A = Eu^{3+}, Dy^{3+}, Sm^{3+}, Er^{3+}$ ) phosphor films via Pechini sol-gel soft lithography. *Optical Materials*, 2003, vol. 23, no. 3–4, pp. 547–558. doi: 10.1016/S0925-3467(03)00020-X
9. Jain A., Hirata G.A. Photoluminescence, size and morphology of red-emitting  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  nanophosphor synthesized by various methods. *Ceramics International*, 2016, vol. 42, no. 5, pp. 6428–6435. doi: 10.1016/j.ceramint.2016.01.053
10. Kuzmenko N.K., Evstropiev S.K., Aseev V.A., Danilovich D.P., Nikonorov N.V., Ignatiev A.I., Matrosova A.S., Demidov V.V., Emerson A.V., Sevastyanova I.M. Polymer-salt synthesis of  $Gd_2O_3:Nd^{3+}$  nanophosphors. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1695, pp. 012184. doi: 10.1088/1742-6596/1695/1/012184
11. Majeed S., Shivaahankar S.A. Rapid, microwave-assisted synthesis of  $Gd_2O_3$  and  $Eu:Gd_2O_3$  nanocrystals: characterization, magnetic, optical and biological studies. *Journal of Materials Chemistry B*, 2014, vol. 2, no. 34, pp. 5585–5593. doi: 10.1039/c4tb00763h
12. Seo S., Yang H., Holloway P.H. Controlled shape growth of Eu- or Tb-doped luminescent  $Gd_2O_3$  colloidal nanocrystals. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 331, no. 1, pp. 236–242. doi: 10.1016/j.jcis.2008.11.016
13. Tamrakar R.K., Bisen D.R., Sahu I.P. Structural characterization of combustion synthesized  $Gd_2O_3$  nanopowder by using glycerin as fuel. *Advance Physics Letter*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 6–9.
14. Sun L., Yao J., Liu C., Liao C., Yan C. Rare earth activated nanosized oxide phosphors: synthesis and optical properties. *Journal of Luminescence*, 2000, vol. 87–89, pp. 447–450. doi: 10.1016/S0022-2313(99)00471-8

15. Tamrakar R.K., Upadhyay K.  $Gd_2O_3$ : A Luminescent Material // *Rare Earth Elements and Their Minerals*. IntechOpen, 2020. P. 186. doi: 10.5772/intechopen.92310
16. Tamrakar R.K., Bisen D.P., Upadhyay K., Sahu M., Sahu I.P., Brahma N. Comparison of emitted color by pure  $Gd_2O_3$  prepared by two different methods by CIE coordinates // *Superlattices and Microstructures*. 2015. V. 88. P. 382–388. doi: 10.1016/j.spmi.2015.09.033
17. Michel C.R., López-Contreras N.L., Martínez-Preciado A.H. Gas sensing properties of  $Gd_2O_3$  microspheres prepared in aqueous media containing pectin // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2013. V. 177. P. 390–396. doi: 10.1016/j.snb.2012.11.018
18. Atabaev T.Sh., Hong H.T., Piao Z., Hwang Y.-H., Kim H.-K. Tailoring the luminescent properties of  $Gd_2O_3:Tb^{3+}$  phosphor particles by codoping with  $Al^{3+}$  ions // *Journal of Alloys and Compounds*. 2012. V. 541. P. 262–268. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.06.119
19. Goldys E.M., Drozdowicz-Tomsia K., Jinjun S., Dosev D., Kennedy I.M., Yatsunenko S., Godlewski M. Optical characterization of Eu-doped and undoped  $Gd_2O_3$  nanoparticles synthesized by the hydrogen flame pyrolysis method // *Journal of the American Chemical Society*. 2006. V. 128. N 45. P. 14498–14505. doi: 10.1021/ja0621602
20. Costa G.A., Artini C., Ubaldini A., Carnasciali M.M., Mele P., Masini R. Phase stability study of the pseudobinary system  $Gd_2O_3-Nd_2O_3$  ( $T = 1350^\circ C$ ) // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2008. V. 92. N 1. P. 101–104. doi: 10.1007/s10973-007-8744-x
21. Hao B.V., Huy P.T., Khiem T.N., Nguen T., Thanh Ngan N.T., Duong P.H. Synthesis of  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  micro- and nanophosphors by sol-gel process // *Journal of Physics: Conference Series*. 2009. V. 187. P. 012074. doi: 10.1088/1742-6596/187/1/012074
22. Gorelova A.V., Evstropiev S.K., Efremov A.M., Konovalov A.V., Petrovskii G.T., Semenov A.D., Shashkin V.S. Inorganic sol-gel synthesis of monolithic silica glasses with the use of aerosols // *Glass Physics and Chemistry*. 1999. V. 25. N 3. P. 274–280.
23. Guo H., Yang X., Xiao T., Zhang W., Lou L., Mugnier J. Structure and optical properties of sol-gel derived  $Gd_2O_3$  waveguide films // *Applied Surface Science*. 2004. V. 230. N 1–4. P. 215–221. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.02.032
24. Михайлов М.Д., Мамонова Д.В., Колесников И.Е., Маньшина А.А. Исследование оптических свойств наночастиц  $YAG:Nd$  // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 4. С. 340.
25. Morales Pamíres A.D.J., García Murillo A., Carillo Romo F. de J., García Hernández M., Jaramillo Viguera D., Chaderyron G., Boyer D. Properties of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}, Tb^{3+}$  nanopowders obtained by sol-gel process // *Materials Research Bulletin*. 2010. V. 45. N 1. P. 40–45. doi: 10.1016/j.materresbull.2009.09.005
26. Evstropiev S.K., Vasilyev V.N., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Volkova N.A., Boltentov I.A. Photoactive ZnO nanosuspension for intensification of organics contaminations decomposition // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2018. V. 134. P. 45–50. doi: 10.1016/j.ccep.2018.10.020
27. Ciriminna R., Meneguzzo F., Delisi R., Pagliaro M. Citric acid: emerging applications of key biotechnology industrial product // *Chemistry Central Journal*. 2017. V. 11. N 1. P. 22. doi: 10.1186/s13065-017-0251-y
28. Evstropiev S.K., Soshnikov I.P., Kolobkova E.V., Evstropiev K.S., Nikonorov N.V., Khrebtov A.I., Dukelskii K.V., Kotlyar K.P., Oreshkina K.V., Nashekin A.V. Polymer-salt synthesis and characterization of MgO-ZnO ceramic coatings with the high transparency in UV spectral range // *Optical Materials*. 2018. V. 82. P. 81–87. doi: 10.1016/j.optmat.2018.05.029
29. Евстропьев К.С., Гатчин Ю.А., Евстропьев С.К., Дукельский К.В., Кисляков И.М., Пегасова Н.А., Багров И.А. Спектрально-люминесцентные свойства золь и покрытий, содержащих квантовые точки CdS/ZnS и поливинилпирролидона // *Оптика и спектроскопия*. 2016. T. 120. № 3. С. 434–441. doi: 10.7868/S0030403416030065
30. Li Q.B., Lin J.M., Wu J.H., Lan Z., Wang J.L., Wang Y., Peng F.G., Huang M.L., Xiao Y.M. Preparation of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  downconversion luminescent material and its application in dye-sensitized solar cells // *Chinese Science Bulletin*. 2011. V. 56. N 28–29. P. 3114–3118. doi: 10.1007/s11434-011-4664-z
31. Физика и спектроскопия лазерных кристаллов / под ред. А.А. Каминского. М.: Наука, 1986. 272 с.
15. Tamrakar R.K., Upadhyay K.  $Gd_2O_3$ : A Luminescent Material. *Rare Earth Elements and Their Minerals*. IntechOpen, 2020, pp. 186. doi: 10.5772/intechopen.92310
16. Tamrakar R.K., Bisen D.P., Upadhyay K., Sahu M., Sahu I.P., Brahma N. Comparison of emitted color by pure  $Gd_2O_3$  prepared by two different methods by CIE coordinates. *Superlattices and Microstructures*, 2015, vol. 88, pp. 382–388. doi: 10.1016/j.spmi.2015.09.033
17. Michel C.R., López-Contreras N.L., Martínez-Preciado A.H. Gas sensing properties of  $Gd_2O_3$  microspheres prepared in aqueous media containing pectin. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, vol. 177, pp. 390–396. doi: 10.1016/j.snb.2012.11.018
18. Atabaev T.Sh., Hong H.T., Piao Z., Hwang Y.-H., Kim H.-K. Tailoring the luminescent properties of  $Gd_2O_3:Tb^{3+}$  phosphor particles by codoping with  $Al^{3+}$  ions. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 541, pp. 262–268. doi: 10.1016/j.jallcom.2012.06.119
19. Goldys E.M., Drozdowicz-Tomsia K., Jinjun S., Dosev D., Kennedy I.M., Yatsunenko S., Godlewski M. Optical characterization of Eu-doped and undoped  $Gd_2O_3$  nanoparticles synthesized by the hydrogen flame pyrolysis method. *Journal of the American Chemical Society*, 2006, vol. 128, no. 45, pp. 14498–14505. doi: 10.1021/ja0621602
20. Costa G.A., Artini C., Ubaldini A., Carnasciali M.M., Mele P., Masini R. Phase stability study of the pseudobinary system  $Gd_2O_3-Nd_2O_3$  ( $T = 1350^\circ C$ ). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2008, vol. 92, no. 1, pp. 101–104. doi: 10.1007/s10973-007-8744-x
21. Hao B.V., Huy P.T., Khiem T.N., Nguen T., Thanh Ngan N.T., Duong P.H. Synthesis of  $Y_2O_3:Eu^{3+}$  micro- and nanophosphors by sol-gel process. *Journal of Physics: Conference Series*, 2009, vol. 187, pp. 012074. doi: 10.1088/1742-6596/187/1/012074
22. Gorelova A.V., Evstropiev S.K., Efremov A.M., Konovalov A.V., Petrovskii G.T., Semenov A.D., Shashkin V.S. Inorganic sol-gel synthesis of monolithic silica glasses with the use of aerosols. *Glass Physics and Chemistry*, 1999, vol. 25, no. 3, pp. 274–280.
23. Guo H., Yang X., Xiao T., Zhang W., Lou L., Mugnier J. Structure and optical properties of sol-gel derived  $Gd_2O_3$  waveguide films. *Applied Surface Science*, 2004, vol. 230, no. 1–4, pp. 215–221. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.02.032
24. Mikhaylov M.D., Mamonova D.V., Kolesnikov I.E., Manshina A.A. Optical properties of YAG: Nd nanoparticles. *Modern problems of science and education*, 2012, no. 4, pp. 340. (in Russian)
25. Morales Pamíres A.D.J., García Murillo A., Carillo Romo F. de J., García Hernández M., Jaramillo Viguera D., Chaderyron G., Boyer D. Properties of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}, Tb^{3+}$  nanopowders obtained by sol-gel process. *Materials Research Bulletin*, 2010, vol. 45, no. 1, pp. 40–45. doi: 10.1016/j.materresbull.2009.09.005
26. Evstropiev S.K., Vasilyev V.N., Nikonorov N.V., Kolobkova E.V., Volkova N.A., Boltentov I.A. Photoactive ZnO nanosuspension for intensification of organics contaminations decomposition. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2018, vol. 134, pp. 45–50. doi: 10.1016/j.ccep.2018.10.020
27. Ciriminna R., Meneguzzo F., Delisi R., Pagliaro M. Citric acid: emerging applications of key biotechnology industrial product. *Chemistry Central Journal*, 2017, vol. 11, no. 1, pp. 22. doi: 10.1186/s13065-017-0251-y
28. Evstropiev S.K., Soshnikov I.P., Kolobkova E.V., Evstropiev K.S., Nikonorov N.V., Khrebtov A.I., Dukelskii K.V., Kotlyar K.P., Oreshkina K.V., Nashekin A.V. Polymer-salt synthesis and characterization of MgO-ZnO ceramic coatings with the high transparency in UV spectral range. *Optical Materials*, 2018, vol. 82, pp. 81–87. doi: 10.1016/j.optmat.2018.05.029
29. Evstrop'ev K.S., Gatchin Y.A., Evstrop'ev S.K., Dukel'skii K.V., Kisl'yakov I.M., Pegasova N.A., Bagrov I.V. Spectral and luminescence properties of sols and coatings containing CdS/ZnS QDs and polyvinylpyrrolidone. *Optics and Spectroscopy*, 2016, vol. 120, no. 3, pp. 415–422. doi: 10.1134/S0030400X16030061
30. Li Q.B., Lin J.M., Wu J.H., Lan Z., Wang J.L., Wang Y., Peng F.G., Huang M.L., Xiao Y.M. Preparation of  $Gd_2O_3:Eu^{3+}$  downconversion luminescent material and its application in dye-sensitized solar cells. *Chinese Science Bulletin*, 2011, vol. 56, no. 28–29, pp. 3114–3118. doi: 10.1007/s11434-011-4664-z
31. *Physics and Spectroscopy of Laser Crystals*. Ed. by A.A. Kaminskii. Moscow, Nauka Publ., 1986, 272 p. (in Russian)

### Авторы

**Муссауи Амир** — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>, [am.moussaoui92@gmail.com](mailto:am.moussaoui92@gmail.com)

**Булыга Дмитрий Владимирович** — студент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>, [dmbulyga@yandex.ru](mailto:dmbulyga@yandex.ru)

**Кузьменко Наталья Константиновна** — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57216750549](https://orcid.org/0000-0002-7213-8231), <https://orcid.org/0000-0002-7213-8231>, [Nataliakuz01@yandex.ru](mailto:Nataliakuz01@yandex.ru)

**Игнат'ев Александр Иванович** — ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57189902013](https://orcid.org/0000-0002-6114-0248), <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>, [ignatiev@oi.ifmo.ru](mailto:ignatiev@oi.ifmo.ru)

**Евстропьев Сергей Константинович** — доктор химических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация; профессор, Санкт-Петербургский государственный технологический институт (Технический университет), Санкт-Петербург, 190013, Российская Федерация, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>, [evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

**Никоноров Николай Валентинович** — доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, [Nikonorov@oi.ifmo.ru](mailto:Nikonorov@oi.ifmo.ru)

### Authors

**Amir Moussaoui** — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-7858-7417>, [am.moussaoui92@gmail.com](mailto:am.moussaoui92@gmail.com)

**Dmitry V. Bulyga** — Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57217158694](https://orcid.org/0000-0001-8861-2527), <https://orcid.org/0000-0001-8861-2527>, [dmbulyga@yandex.ru](mailto:dmbulyga@yandex.ru)

**Natalia K. Kuzmenko** — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57216750549](https://orcid.org/0000-0002-7213-8231), <https://orcid.org/0000-0002-7213-8231>, [Nataliakuz01@yandex.ru](mailto:Nataliakuz01@yandex.ru)

**Alexander I. Ignat'ev** — Lead Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57189902013](https://orcid.org/0000-0002-6114-0248), <https://orcid.org/0000-0002-6114-0248>, [ignatiev@oi.ifmo.ru](mailto:ignatiev@oi.ifmo.ru)

**Sergey K. Evstropiev** — D.Sc., Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation; Professor, St. Petersburg State Institute of Technology (Technical University), Saint Petersburg, 190013, Russian Federation, [sc 6507317768](https://orcid.org/0000-0002-0160-8443), <https://orcid.org/0000-0002-0160-8443>, [evstropiev@bk.ru](mailto:evstropiev@bk.ru)

**Nikolay V. Nikonorov** — D.Sc., Full Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7003772604](https://orcid.org/0000-0002-1341-067X), <https://orcid.org/0000-0002-1341-067X>, [Nikonorov@oi.ifmo.ru](mailto:Nikonorov@oi.ifmo.ru)

*Статья поступила в редакцию 03.03.2021*

*Одобрена после рецензирования 20.03.2021*

*Принята к печати 30.03.2021*

*Received 03.03.2021*

*Approved after reviewing 20.03.2021*

*Accepted 30.03.2021*



Работа доступна по лицензии  
Creative Commons  
«Attribution-NonCommercial»